

Выбор места установки и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации для повышения устойчивости электроэнергетической системы

А.А. Мартиросян, М.В. Зотова, Д.Н. Кормилицын
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: akopmartirosian@gmail.com, MariZotowa@yandex.ru, dimak91dimak91@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известным мероприятием по повышению пропускной способности линий электропередачи сверхвысокого напряжения является применение управляемых устройств продольной компенсации. Кроме того, такие управляемые устройства положительно влияют на запас по аperiodической статической устойчивости системы, что является особенно актуальным в связи с ростом нагрузки и последними аварийными ситуациями в энергосистеме России. Таким образом, актуальной является задача разработки математической модели электроэнергетической системы в целях повышения ее устойчивости на основе выбора места установки и параметров закона регулирования двух устройств продольной компенсации с тиристорным управлением с учетом автоматических регуляторов возбуждения на синхронных генераторах электростанции.

Материалы и методы: Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применяется программное обеспечение Matlab.

Результаты: Разработана математическая модель электроэнергетической системы с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с двумя управляемыми устройствами продольной емкостной компенсации, которая позволяет рассчитывать как установившиеся, так и переходные режимы. Определены оптимальные расстояния между устройствами продольной компенсации и параметры закона регулирования продольной компенсации как с точки зрения наибольшей пропускной способности линии, так и с точки зрения допустимости напряжений на выводах конденсаторных батарей. Анализ статических характеристик электроэнергетической системы при использовании регулируемых устройств продольной компенсации показал их высокую эффективность в повышении пределов передаваемой мощности и улучшении аperiodической статической устойчивости электроэнергетической системы.

Выводы: Разработанная модель может применяться при решении задач проектирования дальних линий электропередачи с управляемыми элементами, с ее помощью производится оценка статической устойчивости электроэнергетической системы и определяются параметры закона регулирования управляемых устройств продольной компенсации. При установке на линии двух управляемых устройств продольной компенсации, установленных на расстоянии 300 км друг от друга (оптимальное расстояние между устройствами продольной компенсации с точки зрения наибольшей пропускной способности линии и напряжений на выводах конденсаторных батарей), удалось добиться увеличения предела передаваемой мощности по устойчивости до предела передаваемой мощности по нагреву.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, устройство продольной емкостной компенсации, распределенная продольная компенсация, пропускная способность линии, автоматическое регулирование возбуждения.

Selection of installation sites and law of control for controlled series compensation devices in order to improve electric power system stability

A.A. Martirosyan, M.V. Zotova, D.N. Kormilitsyn
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: akopmartirosian@gmail.com, MariZotowa@yandex.ru, dimak91dimak91@gmail.com

Abstract

Background: A well-known measure to increase the ultra-high voltage transmission line capacity is the usage of controlled series compensation devices. In addition, such controlled elements have a positive effect on the static stability margins of the system. Nowadays this issue has become particularly important due to the latest accidents in the Russian electric power system. Consequently, the urgent problem is to develop a mathematical model of the electric power system in order to increase the stability of electric power systems based on the choice of the installation site and the parameters of the regulation law of two series compensation devices with thyristor control, taking into account automatic excitation control devices installed on the synchronous generators.

Materials and Methods: In order to solve these problems, we used methods of mathematical modeling of electric power systems, the theory of long-distance power transmission lines and electromechanical transients, and methods of analyzing electric power system stability. We also applied Matlab as a simulation tool.

Results: We have developed a mathematical model of electric power system taking into account electromagnetic transients in its elements with two controlled series compensation devices. This model allows calculating both steady-state

and transient modes. We have also determined the optimal distances between controlled series compensation devices and their regulation law parameters both in terms of power line capacity and permissible voltages at series compensation device terminals. The analysis of the static characteristics of electric power systems with controlled series compensation devices has shown their high efficiency in increasing the limits of transmission capacity and improving the system aperiodic steady-state stability.

Conclusions: The developed model can be used to solve problems of designing long-distance transmission lines with controllable elements. It can be used to evaluate the steady state stability of the electric power system and to determine regulation law parameters of series compensation devices. When two controlled series compensation devices are installed at a distance of 300 km from each other (the optimum distance between the series compensation in terms of the transmission line capacity and the voltage at series compensation devices terminals), the stability transmission power limit achieves the thermal transmission power limit.

Key words: electric power system, controlled series compensation device, distributed controlled series compensation, power line capacity, automatic excitation control.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.030-036

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется повышению пропускной способности линий электропередачи, что объясняется ростом нагрузки, соответствующим возрастанием перетоков активной мощности по линиям, проблемами, связанными с сооружением новых линий и увеличением числа аварий, возникающих из-за слабости межсистемных связей. Одним из путей решения этой задачи для протяженных линий является применение устройств продольной компенсации (УПК). Эти устройства известны давно. Они не получили большого применения в России, но достаточно широко применяются в мировой практике (США, Швеция, Китай, Индия, Бразилия) [1].

Известны два пути выполнения продольной емкостной компенсации – сосредоточенная компенсация и распределенная. В первом случае УПК сооружается только в одной точке какой-либо линии. Во втором случае УПК сооружаются в двух или более точках одной и той же линии [2]. Одним из недостатков, присущих сосредоточенной компенсации, является повышение напряжения на выводах УПК, что вынуждает применять шунтирующие реакторы (ШР). Это приводит к усложнению схемы УПК и увеличению стоимости всего устройства. Однако, если распределить емкостное сопротивление вдоль линии электропередачи, можно добиться снижения напряжения на выводах УПК и установка реакторов в некоторых случаях может не потребоваться.

В связи с этим необходимо повышение устойчивости электроэнергетических систем на основе выбора места установки и законов регулирования двух управляемых УПК. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка полной математической модели электроэнергетической системы (с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с двумя управляемыми устройствами продольной емкостной компенсации);
- анализ статических характеристик исследуемой системы при различных параметрах закона регулирования УПК;
- исследование влияния параметров закона регулирования УПК на аperiodическую статическую устойчивость системы;

- исследование влияния места установки двух устройств продольной компенсации на пропускную способность линии электропередачи и на аperiodическую устойчивость электроэнергетической системы.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применяется программное обеспечение Matlab.

Исследуемая электроэнергетическая система состоит из электростанции, представленной эквивалентным генератором, связанной линией электропередачи, имеющей одно или два УПК с регулируемой емкостью, с мощной приемной системой, представленной шинами неизменного напряжения и частоты (рис. 1). Схема замещения исследуемой системы представлена на рис. 2.

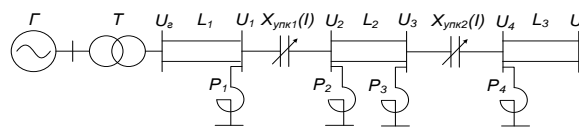


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

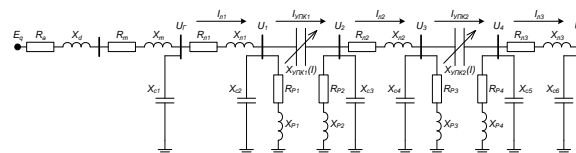


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Одной из основных задач является повышение устойчивости электроэнергетической системы, поэтому рассматривается регулируемое устройство продольной компенсации, степень компенсации которого возрастает с ростом передаваемой мощности и наоборот. Для этого предложена следующая форма функциональной зависимости сопротивления управляемой емкости от тока [3]:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - K_2 \cdot I)}, \quad (1)$$

где I – ток через УПК, кА; $X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление УПК, Ом; $\omega_0 = 2\pi f$, где f – частота переменного тока, Гц; K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{\text{УПК}}(I)$, определение которых является первоочередной задачей при проведении расчетов. На рис. 3 представлены зависимости емкости от тока при различных параметрах регулирования.

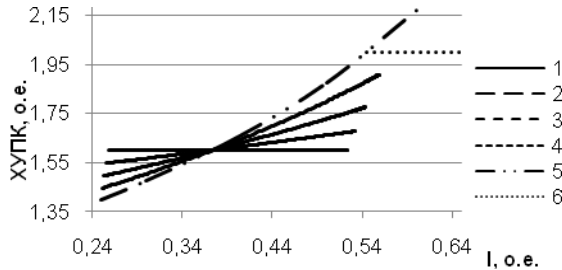


Рис. 3. Зависимости емкостного сопротивления от тока: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 2$; 3 – $K_2 = 4$; 4 – $K_2 = 6$; 5 – $K_2 = 8$; 6 – при фиксировании $X_{\text{УПК}}(I)$

Одними из наиболее распространенных управляемых устройств продольной компенсации, обеспечивающими возможность регулирования потока мощности в линиях электропередачи, являются тиристорные устройства продольной компенсации (ТУПК), получившие в англоязычной литературе название Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) [4]. Эти устройства работают на основе схемы, предусматривающей регулирование тока в реакторе с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров. Упрощенная схема участка линии электропередачи с устройством продольной компенсации с тиристорным управлением изображена на рис. 4.

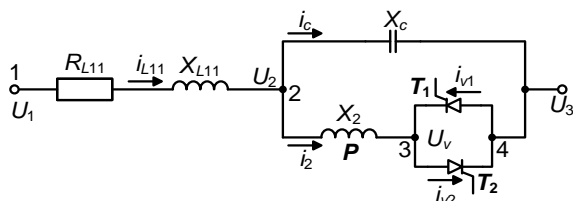


Рис. 4. Схема замещения участка линии с ТУПК: P – реактор; T_1, T_2 – 1-й и 2-й тиристоры соответственно; $(U_v - U_3)$ – напряжение на вентильной фазе; $(U_2 - U_3)$ – фазное напряжение УПК; X_2 – индуктивное сопротивление реактора; X_c – емкостное сопротивление батареи конденсаторов; i_c – фазный ток батареи конденсаторов; i_{v1}, i_{v2} – фазный ток 1-го и 2-го тиристора соответственно; i_2 – ток через тиристорную группу

Для выбора параметров основного оборудования устройства и получения закона его управления необходимо получить функциональную зависимость между эквивалентным сопротивлением УПК и углом отпирания тиристоров α . Разложение кривых тока и напряжения на вентильях в ряд Фурье дает значение амплитуд гармоник тока и напряжений. С учетом параллельно соединенного конденсатора получено выражение для эквивалентного сопротивления УПК (2):

$$X_{\text{УПК}}(\alpha) = \frac{\pi X_2 X_C}{\pi X_2 - 2\pi X_C + 2\alpha X_C - X_C \sin(2\alpha)}. \quad (2)$$

Из (2) с помощью метода наименьших квадратов была получена следующая зависимость:

$$\alpha(X_{\text{УПК}}) = A(X_{\text{УПК}})^{-B}, \quad (3)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от параметров реактора и конденсатора устройства продольной компенсации.

При подстановке (1) в (3) был получен закон регулирования угла отпирания тиристоров:

$$\alpha(I) = A \left(\frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - K_2 \cdot I \cdot I_B)} \right)^{-B}. \quad (4)$$

Полученный закон регулирования позволяет проводить исследования в целях формирования требований к параметрам и характеристикам данного устройства для повышения пропускной способности линии электропередачи сверхвысокого напряжения и улучшения устойчивости исследуемой электроэнергетической системы [5].

Для определения оптимального расстояния между двумя УПК и учета распределенности параметров для участков линии был использован метод эквивалентного четырехполюсника. Параметры четырехполюсников, представляющие отдельные участки линии, определялись с использованием гиперболических функций в программной среде Mathcad. Пропускная способность линии определяется значением коэффициента B_3 эквивалентного четырехполюсника, значение которого зависит от длины линии, места расположения УПК на линии и степени компенсации эквивалентных параметров участка линии электропередачи. При нахождении оптимального расположения УПК следует найти условия, при которых коэффициент B_3 будет иметь минимальное значение, что соответствует наибольшей пропускной способности линии при заданной степени компенсации [1].

Результаты исследования. Рассматривались линии электропередачи напряжением 500 кВ с проводами марки ЗхАС-500/64 длиной от 300 до 1000 км. Анализ проводился для линий с одной и двумя установками продольной емкостной компенсации, которые могут быть как управляемыми, так и неуправляемыми.

Анализ результатов расчета (см. таблицу) показал, что с увеличением сопротивления УПК и длины линии для достижения минимального значения коэффициента B_3 , необходимо располагать УПК дальше от центра линии.

Минимальные значения коэффициента B_3 и оптимальные расстояния L_2 между двумя УПК при различных значениях длины линии и степеней компенсации индуктивного сопротивления линии k_c

L , км	k_c , %	B_{\min} , Ом	L_2 при B_{\min} , км	$P_{\text{пред.уст.}}$, МВт
$L = 500$ км	30	103,9	69	2406
	40	90,4	93	2765
	60	63,2	142	3956
	80	35,5	190	7042
$L = 800$ км	30	160,7	96	1556
	40	142,6	131	1753
	60	105,8	203	2363
	80	68,2	277	3666
$L = 1000$ км	30	193,6	104	1291
	40	174,6	150	1432
	60	135,8	220	1841
	80	95,6	316	2615

Построены графики зависимостей коэффициента B_3 эквивалентного четырехполюсника от расстояния между двумя УПК для линии длиной 300, 500, 800 и 1000 км (рис. 5). Результаты расчета показали, что для линий длиной до 500 км значение коэффициента B_3 мало зависит от расстояния между УПК и явный минимум в этом случае отсутствует (рис. 5,а, 5,б). Диапазон изменения этого коэффициента для линии длиной 300 км составил 1–2 %, а для линии длиной 500 км – 2–5 % [1]. Это говорит о том, что для линий длиной до 500 км расстояние между УПК с точки зрения повышения пропускной способности линии не играет существенной роли и УПК могут быть сооружены как в центре линии, так и в любой другой ее точке. А для линий длиной свыше 500 км (рис. 5,в, 5,г) при изменении расстояния между УПК такой минимум уже более явно выражен и оптимальное расстояние между УПК существует и составляет примерно от 100 до 300 км в зависимости от степени компенсации индуктивного сопротивления линии.

Для оценки уровней напряжений были проанализированы графики распределения напряжений вдоль линии длиной 500, 800 и 1000 км со степенью компенсации 30, 40, 60 и 80 % при установке в линии двух УПК. Результаты расчета показали, что для линии длиной 500 км напряжение во всех точках линии не выходит за рамки допустимого, но уже при больших длинах напряжение превышает допустимое значение, что требует мероприятий по его снижению [6].

Анализ статической устойчивости и расчеты статических характеристик исследуемой электроэнергетической системы (рис. 1) выполнены по разработанной полной математической модели исследуемой системы с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с двумя устройствами продольной емкостной компенсации [7].

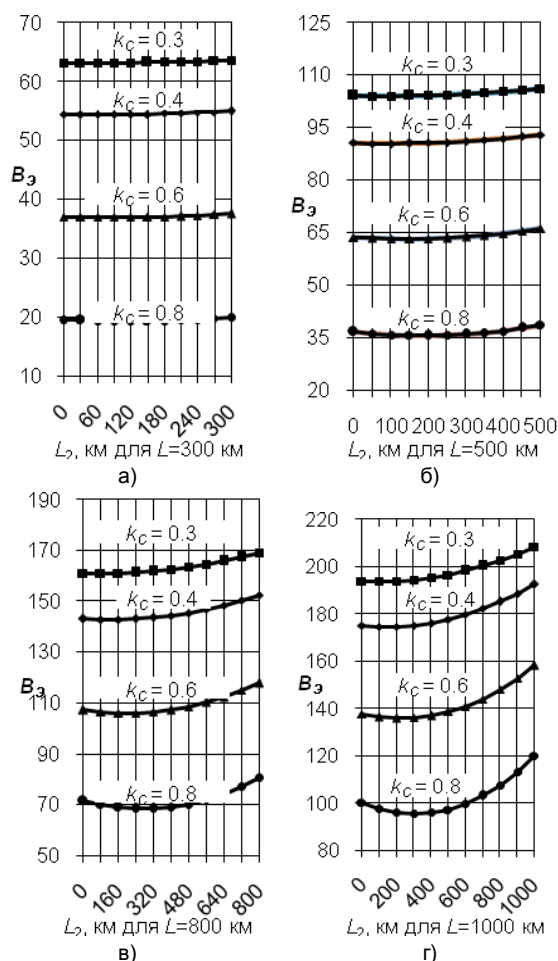


Рис. 5. Графики зависимостей коэффициента B_3 от расстояния L_2 между двумя УПК для линии длиной: а – $L = 300$ км; б – $L = 500$ км; в – $L = 800$ км; г – $L = 1000$ км

Использование управляемых УПК увеличивает пропускную способность линии и оказывает благоприятное влияние на режимы при изменении передаваемой мощности по линии в широком диапазоне [8]. Применение нерегулируемых УПК создает трудности по обеспечению допустимого режима напряжения при различных перетоках мощности и приводит к проблемам сохранения устойчивости работы электроэнергетической системы. В связи с этим особое значение приобретает использование управляемых УПК, степень компенсации которых возрастает с ростом передаваемой мощности.

Произведены расчеты для рассматриваемой электроэнергетической системы с учетом передаваемой мощности по линии от минимального до максимального значения по условиям устойчивости. Расчеты производились в целях определения места установки двух УПК как с точки зрения повышения предельной передаваемой мощности, так и с точки зрения улучшения режима по уровню напряжения. Построены угловые характеристики активной мощности для линии электропередачи длиной 1000 км с одним и двумя управляемыми УПК и степенью компенсации до 60 % от индуктивного сопротивления линии с учетом и без учета автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Результаты расчета показали, что при использовании одного регулируемого УПК, установленного в центре линии, для поддержания уровня напряжений в допустимых пределах требуется установить по три реактора слева и справа от УПК. На рис. 6 представлены угловые характеристики активной мощности для одного регулируемого УПК без учета АРВ, а на рис. 7 – с учетом АРВ генераторов. Характеристики построены при различных законах регулирования $X_{\text{УПК}}(l)$.

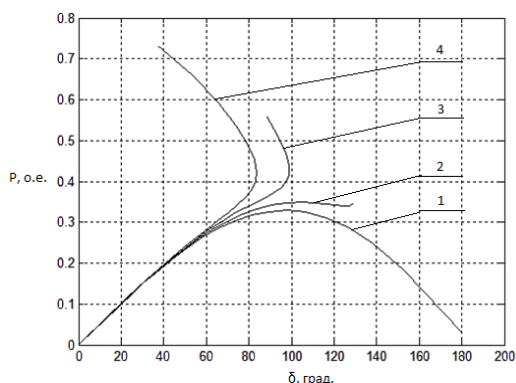


Рис. 6. Угловые характеристики активной мощности без учета АРВ для одного регулируемого УПК: 1 – при

$$X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 6 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 2 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 8 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 3 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 10 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 4 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 12 \cdot l)} \text{ [Ом]}$$

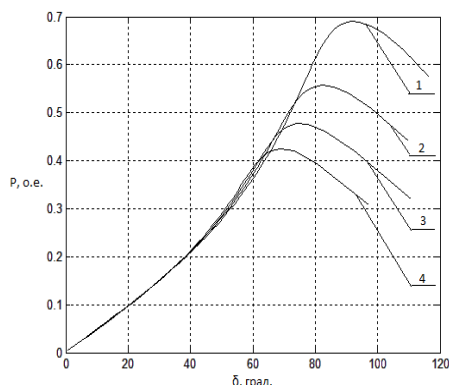


Рис. 7. Угловые характеристики активной мощности с учетом АРВ для одного регулируемого УПК: 1 – при

$$X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 6 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 2 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 8 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 3 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 10 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 4 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 12 \cdot l)} \text{ [Ом]}$$

Построены угловые характеристики активной мощности для двух регулируемых УПК, установленных на расстоянии 220 км друг от друга. Это расстояние является оптимальным с точки зрения получения предельной передаваемой мощности по линии для рассматриваемой степени компенсации 60 %. Результаты расчета показали, что при таком расстоянии между УПК напряжения на выводах первого УПК превышают допустимое значение.

Для поддержания уровня напряжений в допустимых пределах установка по одному реактору слева и справа от каждого УПК оказалась недостаточной. Для регулирования напряжения на

выводах первого УПК необходимо установить еще один дополнительный реактор, также необходимо увеличить расстояние между УПК до 300 км. Угловые характеристики активной мощности для двух регулируемых УПК с расстоянием между ними 300 км без учета АРВ представлены на рис. 8, а с учетом АРВ генераторов – на рис. 9.

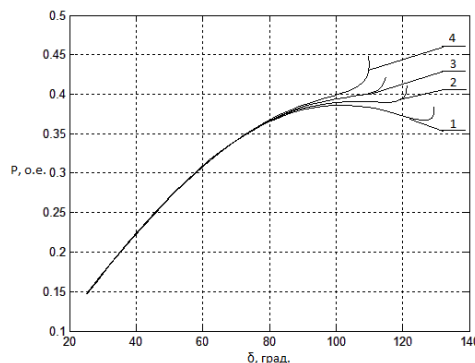


Рис. 8. Угловые характеристики активной мощности без учета АРВ для двух регулируемых УПК: 1 – при

$$X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 26 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 2 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 28 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 3 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 30 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 4 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 32 \cdot l)} \text{ [Ом]}$$

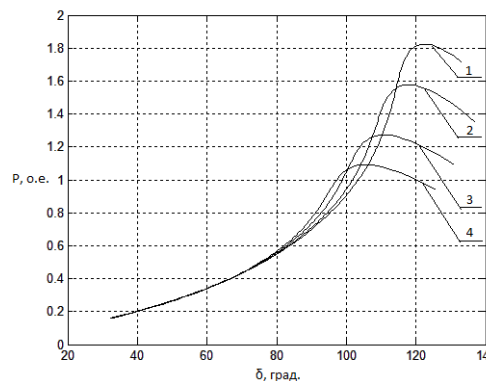


Рис. 9. Угловые характеристики активной мощности с учетом АРВ для двух регулируемых УПК: 1 – при

$$X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 5 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 2 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 6 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 3 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 8 \cdot l)} \text{ [Ом]; } 4 - X_{\text{УПК}}(l) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - 10 \cdot l)} \text{ [Ом]}$$

Анализ статических характеристик математической модели с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах показал, что использование двух управляемых УПК позволяет увеличить предел передаваемой мощности электропередачи (по сравнению с одним управляемым устройством в центре линии электропередачи). Без учета АРВ генераторов предельная передаваемая мощность по устойчивости возрастает на 20 %, а с учетом АРВ она становится равной предельной передаваемой мощности по нагреву. Кроме того, установка двух УПК позволяет использовать меньшее количество реакторов и поддерживать напряжение на выводах УПК и вдоль линии электропередачи сверхвысокого напряжения в допустимых пределах [9].

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Распределенная продольная компенсация, по сравнению с сосредоточенной компенсацией, позволяет снизить напряжение на выводах устройств продольной емкостной компенсации.

2. На линиях напряжением 500 кВ и длиной более 500 км существуют оптимальные расстояния между двумя УПК, соответствующие наибольшей пропускной способности линии. Для линий длиной 300 км такие расстояния не выявлены и УПК могут располагаться в любой точке линии.

3. Напряжение на выводах УПК при применении двух устройств продольной емкостной компенсации при длинах линии более 500 км в режимах холостого хода и малых нагрузок превышает допустимое значение, что требует проведение мероприятий по их снижению, однако при длинах линии менее 500 км напряжение не превышает допустимого значения.

4. Применение нерегулируемых УПК создает трудности по обеспечению допустимого режима напряжения при малых значениях передаваемых мощностей. В связи с этим особое значение приобретает использование управляемых УПК, степень компенсации которых возрастает с ростом передаваемой мощности и уменьшается при снижении передаваемой мощности.

5. Анализ угловых характеристик активной мощности показал, что при установке двух управляемых УПК в линии, по сравнению с установкой одного управляемого УПК с той же суммарной степенью компенсации индуктивного сопротивления линии, предел передаваемой мощности по устойчивости с учетом АРВ генераторов возрастает до предела передаваемой мощности по нагреву.

Список литературы

1. Рыжов Ю.П., Некукар А.Р. О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов на выводах конденсаторных батарей // *Электричество*. – 2012. – № 1.
2. Некукар А.Р. Выбор расположения установок распределенной продольной емкостной компенсации на линии электропередачи // *Вестник МЭИ*. – 2010. – № 4. – С. 5–11.
3. Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередач // *Известия вузов. Энергетика*. – 1978. – № 6. – С. 3–8.
4. Swathi Kommamuri, Sureshbabu P. Optimal Location and Design of TCSC controller For Improvement of Stability // *International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA)*. – 2011. – Vol. 1. – Iss. 2.

Мартirosян Акоп Арамаисович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: akopmartirosian@gmail.com
Martirosyan Akop Aramaisovich
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Science (PhD), Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering
e-mail: akopmartirosian@gmail.com

Зотова Мария Владимировна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант, инженер кафедры электрических систем,
e-mail: MariZotowa@yandex.ru

5. Del Rosso A.D., Canizares C.A., Dona V.M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement // *IEEE Trans, Power Syst.* – 2003. – P. 1487–1496.

6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

7. FACTS: Modeling and Simulation in Power Networks / E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho. – 1st Edn., John Wiley and Sons Inc. – New York, 2004.

8. Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартirosян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // *Вестник ИГЭУ*. – 2012. – Вып. 5. – С. 26–31.

9. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН // *Электричество*. – 2007. – № 9. – С. 48–51.

References

1. Ryzhov, Yu.P., Nekukar, A.R. O vozmozhnosti sooruzheniya na liniyakh SVN ustroystv prodol'noy emkostnoy kompensatsii bez shuntiruyushchikh reaktorov na vyvodakh kondensatornykh batarey [On the possibility of constructing longitudinal capacitive compensation devices on SHV lines without shunt reactors on the terminals of capacitor banks]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 1.
2. Nekukar, A.R. Vybora raspolozheniya ustanovok raspredelennoy prodol'noy emkostnoy kompensatsii na linii elektroperedachi [The choice of the location of distributed longitudinal capacitive compensation on the power line]. *Vestnik MEI*, 2010, no. 4, pp. 5–11.
3. Golov V.P. Primenenie reguliruemoy kompensatsii linii elektroperedach [Use of adjustable compensation of the power line]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.
4. Swathi, Kommamuri, Sureshbabu, P. Optimal Location and Design of TCSC controller For Improvement of Stability. *International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA)*, 2011, vol. 1, issue 2.
5. Del Rosso, A.D., Canizares, C.A., Dona, V.M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement. *IEEE Trans, Power Syst.*, 2003, pp. 1487–1496.
6. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 536 p.
7. Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H., Angeles-Camacho, C. *FACTS: Modeling and Simulation in Power Networks*. 1st Edn., John Wiley and Sons Inc., New York, 2004.
8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvin, I.A., Vinogradova, A.A. Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiy [Stability of the electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.
9. Zarudsky, G.K. O rezul'tatakh issledovaniy po primeneniyu prodol'noy emkostnoy kompensatsii v elektroperedachakh SVN [Results of the investigation into series capacitor appliance in power networks of extra-high voltage]. *Elektrichestvo*, 2007, no. 9, pp. 48–51.

Zotova Maria Vladimirovna
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Course Student, Engineer of the Department of Electrical Power Engineering
e-mail: MariZotowa@yandex.ru

Кормилицын Дмитрий Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант, ассистент кафедры электрических систем
e-mail: dimak91dimak91@gmail.com
Kormilicyn Dmitry Nikolayevich
Ivanovo State Power Engineering University,
Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electrical Power Engineering
e-mail: dimak91dimak91@gmail.com